第 39 卷 第 3 期
2021 年 9 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 39, No. 3
Sept., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.03.07

HI 吸收线星系中的射电连续谱研究

宋 文[1]，吴忠祖[1]，顾敏峰[2]，朱 明[3]，米立功[1,4]，彭 毫[1]

(1. 贵州大学 物理学院，贵阳 550025； 2. 中国科学院 上海天文台 星系与宇宙学重点实验室，上海 200030； 3. 中国科学院 国家天文台，北京 100012； 4. 黔南民族师范学院 物理与电子科学学院，都匀 558000)

摘要： 利用 VLBI 档案数据研究了 5 个在 40% 阿雷西博河外 HI 巡天天区 (α.40 天区) 发现的具有本征 HI 吸收线的星系，分析了它们在毫角秒尺度下的射电结构及亮温度 T_{B}，并计算了星系的 q 值 (远红外流量与射电流量密度之比) 以及利用 WISE (wide-field infrared survey explorer) 数据对星系进行了分类。研究发现 5 个源中的 NGC 315，NGC 5363 存在明显的射电喷流结构，IC 860 和 CGCG 049-057 在 pc 尺度下存在致密的核，但流量小于 NVSS 流量的 20%，以上 4 个源的核区的亮温度均超过 10^6 K，UGC 6081 在毫角秒尺度下没有致密的射电结构，几乎完全分解。通过射电结构、亮温度以及 q 值得出这 5 个源的射电连续谱辐射可能来自射电喷流、星暴活动与射电喷流共存，及纯星暴活动等 3 种情况，说明HI吸收线的探测可能不依赖于中央核区连续谱辐射的类型。利用 WISE 数据分类显示 5 个源可以分为 2 类，3 个为 4.6 μm 亮星系，2 个为 12 μm 亮星系。没有贫尘埃星系，说明这类星系在 α.40 天区的数量较少或 HI 吸收线探测率较低。

关 键 词： 星系；喷流；星暴；远红外；射电结构

中图分类号： P155.2 **文献标识码：** A

1 引 言

H 是星系中最重要的一种元素，21cm HI 谱线的研究对于星系的结构和演化，具有非常重要的作用[1]。H 元素广泛存在于宇宙大尺度到毫角秒尺度的星系核区[2]。21cm HI 吸收线已经广泛应用于高红移河外星系射电噪背景源周围的 HI 气体环境的研究，根据吸收气体的位置不同可以分为本征吸收和类 Lyman-α 吸收[3]。与 HI 发射线相比，河外星系 HI 吸收线的探测依赖于星系中的射电连续谱与 HI 气体的分布，可以用来探测不同分辨率下的 HI 气体的性质。一般只要射电连续谱在高分辨率观测下有足够的射电亮度，就可以在高分辨率下

收稿日期： 2021-04-27； **修回日期：** 2021-05-14

资助项目： 国家自然科学基金 (11763002, U1931203, 11873073)

通讯作者： 吴忠祖，zzwu08@gmail.com

探测到 HI 吸收线，包括毫角秒尺度的 VLBI 观测[2]。星系中的射电连续谱来源主要包括射电喷流、星暴活动或者两者共存，目前在射电波段确定河外星系中央性质的方法，主要是通过高分辨率 VLBI 观测得到核区结构、亮温度 (AGN 亮温度高、致密，而星暴星系则反之)。Condon 等人研究了整体UGC (Uppsala Galaxy Catalog) 样本中各星系的射电辐射和恒星形成活动，利用亮温度 $T_{\rm B}$ 和 q 值来区分这些射电源的射电辐射的能量主要来自 AGN 还是星暴[4]。

Arecibo 的 ALFALFA (Arecibo Legacy Fast ALFA) HI 21 cm 谱线巡天与之前的巡天 (如 HI Parkes ALL-Sky Survey) 相比，在灵敏度和探测深度方面均具有很大的进步，这使得 ALFALFA 巡天更适合寻找 HI 吸收源[3]。Darling 等人[5]对 7% 的 ALFALFA 巡天数据进行 HI 吸收线搜寻，仅探测到 1 个已知的本征 HI 吸收线星系 UGC 6081。Wu 等人在 40% 的 ALFALFA 巡天中 (α.40 天区) 探测到 10 个 HI 吸收星系，都为本征吸收线[6]。其中 5 个是其他望远镜之前观测确认的星系，包括 NGC 315[7],IC 860[8], NGC 5363[9], CGCG 049-057[10], UGC 6081[11]。本文利用档案 VLBI 数据和红外数据对这 5 个源进行了系统性的研究，主要目的是研究这类源的中央核心区的射电连续谱辐射性质，分别从射电的亮温度 $T_{\rm B}$ 和红外波段 q 值及 WISE 类型等角度分析了这些源的物理属性。本文第 2 章简要介绍了数据搜集和数据处理过程；第 3 章对这 5 个源的属性进行分析讨论；第 4 章对本文内容进行总结。本文使用的宇宙参数为：H_0=70 km·s$^{-1}\cdot$ Mpc^{-1}, Ω_m=0.3, Ω_Λ=0.7。

2 数据搜集和数据处理

在本文中，我们搜集了这 5 个源的 VLBA, EVN 以及红外波段数据。其中 VLBA 数据来自 Astrogeo VLBI 数据库①，EVN 的数据来自 EVN 档案数据库②。VLBA 和 EVN 数据均已进行过初步相位校正、幅度校正等处理。我们对数据进行编辑等处理，将数据导入到 DIFMAP (difference mapping) 软件包，进行成图和模型拟合[12]。通过这些处理后，获取到这 5 个源在 pc 尺度下的射电连续谱图像，得到各成分的流量、成分与核心的距离以及模型成分的角直径等参数。数据拟合结果见表 2，数据连续谱图像见图 1，图像参数见表 2。为了进一步了解这 5 个源的属性，我们使用红外手段对其进行分析和分类。其中红外天文卫星数据 (infrared astronomical satellite, IRAS) 来自美国航天局河外数据库 (NASA/IPAC Extragalactic Database, NED)③，WISE 数据来自斯隆数字化巡天 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS)④。样本源的红外属性见表 3。

---

①http://astrogeo.org/vlbi_images/

②http://archive.jive.nl/scripts/avo/fitsfinder.php

③https://ned.ipac.caltech.edu/

④http://skyserver.sdss.org/dr12/en/tools/chart/navi.aspx

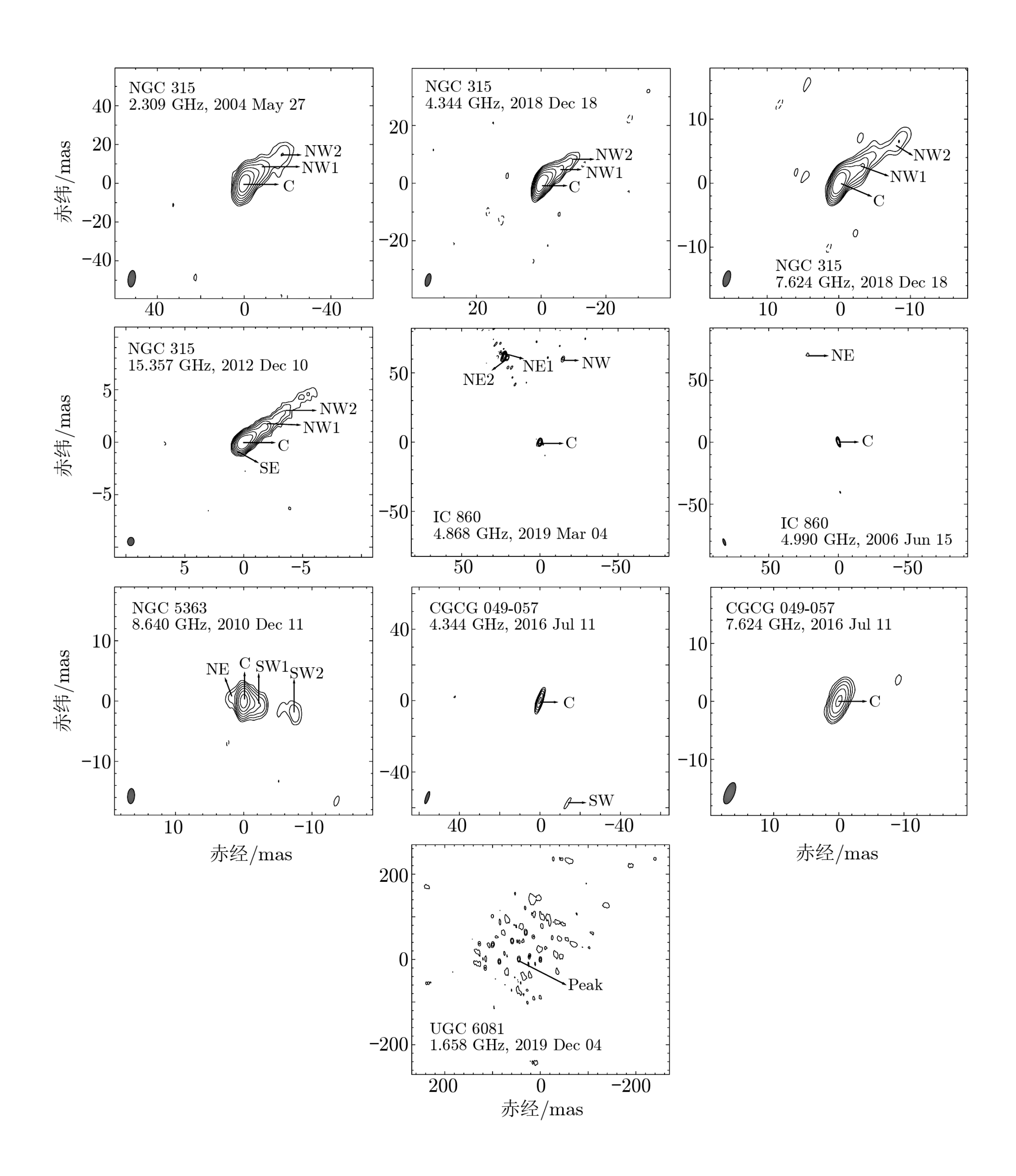


图 1 HI 吸收线星系 NGC 315, IC 860, NGC 5363, CGCG 049-057, UGC 6081 在 pc 尺度下的射电连续谱图像

表 1　数据模型成分参数

源名	日期	阵列	频率 /GHz	成分	S /mJy	θ_d /mas	R /mas	ϕ /(°)	lg $T_{\rm B}$ /K	形态
NGC 315	2004-05-27	VLBA	2.30	C	209.8	2.55	0.00	0.00	10.00	单向喷流
				NW1	153.6	5.95	2.85	−56.29		
				NW2	75.5	18.86	9.69	−53.66		
	2018-12-18	VLBA	4.34	C	321.9	1.49	0.00	0.00	10.11	单向喷流
				NW1	197.9	3.60	2.27	−54.29		
				NW2	79.2	8.90	6.50	−59.97		
	2018-12-18	VLBA	7.62	C	377.3	1.01	0.00	0.00	10.03	单向喷流
				NW1	173.2	4.09	2.05	−52.99		
				NW2	15.0	2.82	6.81	−13.53		
	2012-12-10	VLBA	15.36	C	352.0	0.49	0.00	0.00	10.00	双向喷流
				NW1	72.8	6.14	3.01	−56.83		
				NW2	36.8	0.58	2.37	−54.95		
				SE	175.8	1.01	0.77	−53.31		
IC 860	2006-06-15	EVN	4.99	C	1.5	2.97	0.00	0.00	7.06	致密核
				NE	0.9	1.46	73.8	5.32		
	2019-03-04	EVN	4.86	C	2.3	1.45	0.00	0.00	7.89	致密核
				NE1	6.6	0.89	66.31	7.55		
				NE2	0.5	2.29	64.66	9.07		
				NW	0.4	3.88	64.32	6.50		
NGC 5363	2010-12-11	VLBA	8.64	C	27.1	0.39	0.00	0.00	9.60	双向喷流
				SW1	13.8	2.46	0.98	−93.75		
				SW2	1.8	1.47	7.61	−93.81		
				NE	0.5	3.61	2.03	−91.72		
CGCG 049-057	2016-07-11	VLBA	4.34	C	8.8	0.85	0.00	0.00	9.03	致密核
				SW	0.6	6.19	58.63	−176.66		
	2016-07-11	VLBA	7.62	C	11.3	0.82	0.00	0.00	8.69	致密核
UGC 6081	2019-12-04	EVN	1.66	Peak	40.8	570.9	—	—	4.86	分解
				—	—	—	—	—		

表 2　射电连续谱图像参数

源名	日期	阵列	$S_{\rm Peak}$ /mJy·beam^{-1}	HPBW /mas×mas, (°)	噪声(3σ) /mJy·beam^{-1}	等高线
NGC 315	2004-05-27	VLBA	228	7.67×2.56, −5.61	3.22	(−1 1 2 4 8 16 32 64)
	2018-12-18	VLBA	333	4.26×1.38, −14.9	1.90	(−1 1 2 4 8 16 32 64)
	2018-12-18	VLBA	326	2.42×0.79, −14.2	1.99	(1 2 4 8 16 32 64)
	2012-12-10	VLBA	313	0.81×0.56, −5.03	1.01	(−1 1 2 4 8 16 32 64)
IC 860	2006-06-15	EVN	1.05	5.72×1.65, 16.4	0.37	(0.75 1 1.5 2)
	2019-03-04	EVN	5.54	2.93×1.35, −11.8	0.12	(−1 1 2 4 8 16 32)
NGC 5363	2010-12-11	VLBA	29.7	2.54×1.04, −3.22	0.27	(−1 1 2 4 8 16 32 64)
CGCG 049-057	2016-07-11	VLBA	8.75	7.15×1.66, −16.4	0.44	(1 2 4 8 16 32)
	2016-07-11	VLBA	11	3.90×1.49, −19.1	0.28	(1 2 4 8 16 32)
UGC 6081	2019-12-04	EVN	2.14	6.93×3.03, 11.7	0.59	(1 2)

表 3 样本源的射电和红外属性

源名	z	$S_{\rm NVSS}$ /mJy	$S_{60\mu m}$ /Jy	$S_{100\mu m}$ /Jy	$q_{\rm NVSS}^{\rm IRAS}$	$W1$	$W2$	$W3$	$W4$	$W1-W2$	$W2-W3$
NGC 315	0.016	772.1	0.27	0.71	−0.21	9.39	9.35	7.44	4.79	0.04	1.91
IC 860	0.011	30.8	18.61	18.66	2.86	10.92	10.75	7.01	2.61	0.17	3.74
NGC 5363	0.0038	160.3	1.77	5.22	1.31	8.32	8.33	6.50	4.85	−0.01	1.83
CGCG 049-057	0.013	53.3	21.89	31.53	2.74	11.08	10.75	6.70	3.14	0.33	4.05
UGC 6081	0.036	184.1	—	—	—	11.72	11.09	7.22	4.26	0.63	3.87

3 结果与讨论

3.1 毫角秒尺度射电结构

如图 1 所示，我们给出了这 5 个源的射电连续谱图像。NGC 315 与 NGC 5363 这 2 个源存在明显的射电喷流：NGC 315 在 15.36 GHz 的 VLBA 数据中显示东南 (SE) 方向也有微弱的喷流，这与前人研究的高分辨率射电结构一致[13]；NGC 5363 在 8.6 GHz 的 VLBA 图像中能明显看到在东北和西南方向都有喷流，大尺度下 (kpc) 有一个弯曲的喷流[14]。IC 860 和 CGCG 049-057 都属于 亮红外星系[8, 15]，其中 IC 860 还是一个具有星暴后期光谱的星系[16]。从射电结构图中可以看出这些源在毫角秒尺度下均存在致密的核，其中 CGCG 049-057 只存在 1 个成分，而 IC 860 存在 2 个成分，其中东北方向 (N E) 的成分流量变化剧烈，在 5 GHz 波段，该成分的射电流量从 2006 年的 0.9 mJy 变为 2019 年的 7.1 mJy。这 2 个源核区结构致密，亮温度高于 10^7 K，说明射电辐射很可能来自于活动星系核的射电喷流。另外我们发现这 2 个源的毫角秒尺度的流量 (见表 2) 不超过各自 NVSS 总流量 (见表 2) 的 20%，说明这 2 个源在 VLBI 尺度上的射电连续谱流量大部分都分解了，这些分解的流量很可能来自星暴活动。UGC 6081 在 pc 尺度下完全分解，没有明显的射电结构，说明射电辐射可能主要来自于星暴活动。

3.2 喷流的亮温度

通常认为 AGN 射电喷流占主导的射电源具有明显的射电结构，或者在 1.4 GHz 波段的亮温度大于 10^5 K[4]。为了了解这些源的亮温度情况，本文通过高斯拟合得到射电成分模型参数，并利用式 (1) 计算得到亮温度 $T_{\rm B}$[17] (结果见表 2)：

$$T_{\rm B} = 1.77 \times 10^{12} (S_\nu) \nu^{-2} \theta_d^{-2} (1 + z) \quad . \tag{1}$$

其中，S_ν 为成分的流量密度，以 Jy 为单位，ν 为相应的观测频率，以 GHz 为单位，θ_d 为成分的角直径，以 mas 为单位，z 为源的红移。AGN 主导的射电源的亮温度在频率大于 0.03 GHz 的情况下，亮温度超过 10^6 K；在频率超过 1 GHz 时，亮温度超过 10^5 K[18, 19]。这些源的亮温度都来自小尺度的核区，如果亮温度低于 10^6 K，射电源的核区可能就不是 AGN。我们发现其中 4 个源在小尺度的亮温度均大于 10^6 K，这表明这些星系的内部很可能存在 AGN 射电喷流成分。在 1.66 GHz 的 EVN 数据中，UGC 6081 的亮温度为 $10^{4.89}$ K，

这说明 UGC 6081 可能是星暴星系。由表 2 可知，这些源的亮温度在 $10^{4.89} \sim 10^{10.1}$ K 之间，均小于能量均分亮温度 5×10^{10} K[20]。因此，在我们的样本中，喷流集束效应并不显著。

3.3　q 值

对于高分辨率下的连续谱图像只存在致密核的星系，通常可以利用 FIR 流量与射电流量密度之比 (一般称为 q 值)[21] 来分析射电连续谱的起源。星暴星系的远红外流量远大于射电流量，这是由年轻的大质量恒星产生的尘埃加热所造成。研究发现星暴核区的远红外和非热射电亮度之间存在很强的相关性，所以远红外波段观测是研究恒星形成率的一个合适的工具[22]。AGN成分的贡献与 q 值的大小成反比，q 值越小，则星系中的辐射更偏向 AGN 为主导。q 值的计算方法如下[22, 23]：

$$q = \lg\left(\frac{FIR}{3.75 \times 10^{12}}\right) - \lg(S_{\rm NVSS}) \quad , \tag{2}$$

其中，$FIR = 1.26 \times 10^{-14}(2.58 S_{60\mu\rm m} + S_{100\mu\rm m})$。这里 $S_{60\mu\rm m}$，$S_{100\mu\rm m}$ 分别为 IRAS 在波长为 60 μm 和 100 μm 的流量密度 (见表 2)。本文中的 5 个源，只有 NGC 315, IC 860, NGC 5363 和 CGCG 049-057 这 4 个源存在 IRAS 流量密度 (见表 2)。当大部分射电辐射能量由 AGN 提供时，辐射受 FIR 的影响较小，因此 q 值偏低，所以 AGN 辐射占主导星系的 q 值小于2[19]。利用公式 (2) 我们计算得到其中 4 个源的 q 值 (见表 2)，结果表明 IC 860 的 q 值 2.86 和 CGCG 049-057 的 q 值 2.74 均在 $2.2 \sim 3.0$ 之间，所以从这一角度来看可以知道这 2 个星系的 NVSS 尺度射电辐射主要来自星暴成分；而 NGC 315 与 NGC 5363 这 2 个源的 q 值都远小于 2.0，这表明这 2 个源的射电辐射主要来自射电喷流。这与我们在 3.1 节中利用射电结构，VLBI 尺度和 NVSS 尺度的射电流量的比值对这 4 个源分析得到的结果一致。

3.4　5 个源的 WISE 分类

通过 WISE 红外卫星四个不同波段数据 $W1$, $W2$, $W3$, $W4$，可把星系分成 4 种不同的类型[24, 25]：(1) $W1 - W2$ >0.5，周围存在大量热尘埃的活动星系核；(2) $W1 - W2$ <0.5 且 $W2 - W3$ <1.6，贫尘源，一般存在于低激发态射电星系；(3) $W1 - W2$ <0.5 且 1.6< $W2 - W3$ <3.4，中红外辐射通过尘埃连续谱和多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 增强的星系，在 12 μm 波段的红外辐射较亮，称为 12μm 亮星系；(4) $W1 - W2$ <0.5 且 $W2 - W3$ >3.4，富含尘埃的星暴星系，一般见于恒星形成率高的星系和窄线射电星系。我们收集了这 5 个源的 4 种 WISE 波段数据 (见表 2)。我们发现 NGC 315 和 NGC 5363 符合第 3 种情况，被称为 12 μm 亮星系[24]。UGC 6081 满足第 1 个标准，属于周围存在大量热尘埃的活动星系核。IC 860 和 CGCG 049-057 满足第 4 个标准，属于富含尘埃的星暴星系，与我们在射电角度上的分析一致。UGC 6081, IC 860 和 CGCG 049-057 这 3 个源分别符合第 1 和第 4 种情况，由于这些星系在 4.6 μm 波段会有增亮现象，因此该类星系被称为 4.6 μm 亮星系[24]。这 5 个源都没有满足第 2 个标准即没有贫尘源，说明贫尘源可能在 α.40 天区较少，或者这类源HI 吸收深度较低。

4 总结

本文通过使用 EVN 和 VLBA 多历元、多波段的数据，研究了 NGC 315, IC 860, NGC 5363, CGCG 049-057 和 UGC 6081 这 5 个 α.40 天区发现的HI 吸收星系的射电结构、亮温度 $T_{\rm B}$ 和 q 值等性质，并基于 WISE 数据进行分类。通过研究发现，从射电结构和亮温度上看，这 5 个源的射电辐射来源可以分为 3 种类型：(1) 主要来自活动星系核的喷流。NGC 315 和 NGC 5363 在 pc 尺度都具有双向喷流，且射电亮温度较高，这说明射电连续谱辐射主要来自于喷流。(2) 主要贡献来自星暴活动，但可能有射电喷流的贡献。IC 860 与 CGCG 049-057 在 pc 尺度有致密射电结构且射电亮温度大于 10^6 K，但是 NVSS 大部分流量已经分解说明这两个源的射电连续谱主要来自星暴活动。(3) 完全来自星暴活动。UGC 6081 在 pc 尺度的射电连续谱几乎完全分解，不存在致密成分，说明这个星系核心区的射电辐射应该没有射电喷流的贡献。通过计算 4 个源的 q 值，确定了 NGC 315 与 NGC 5363 应为 AGN，而 IC 860 与 CGCG 049-057 应为星暴星系，这与通过射电结构和亮温度得到的结果一致。利用红外 WISE 数据分类发现，5 个源中 2 个为 12 μm 亮星系，3 个为 4.6 μm 亮星系，不存在贫尘星系，说明贫尘星系可能在 40% ALFALFA 天区较少，或者 HI 吸收深度较低。

参考文献：

[1] Haynes M P. American Institute of Physics Conference Series, 2008, 1035: 337
[2] Morganti R, Oosterloo T. A&ARv, 2018, 26: 4
[3] Giovanelli R, Haynes M P. A&ARv, 2015, 24: 1
[4] Condon J J, Cotton W D, Broderick J J. AJ, 2002, 124: 675
[5] Darling J, Macdonald E P, Haynes M P, et al. ApJ, 2011, 742: 60
[6] Wu z z, Haynes M P, Giovanelli R, et al. ChA&A, 2015, 39: 466
[7] Morganti R, Peck A B, Oosterloo T A, et al. A&A, 2009, 505: 559
[8] Schmelz J T, Baan W A, Haschick AD, et al. AJ, 1986, 92: 1291
[9] van Gorkom J H, Knapp G R, Ekers R D, et al. AJ, 1989, 97: 708
[10] Baan W A, Henkel C, Haschick A D, et al, ApJ, 1987, 320: 154
[11] Williams B A, Brown R L. AJ, 1983, 88: 1749
[12] Shepherd M C, Pearson T J, Taylor G B. BAAS, 1994, 26: 987
[13] Venturi T, Giovannini G, Feretti L, et al. ApJ, 1993, 408: 81
[14] Hummel E, van der Hulst J M, Dickey J M. A&A, 1984, 134: 207
[15] Herrero-Illana R, Pérez-Torres M Á, Randriamanakoto Z, et al. MNRAS, 2017, 471: 1634
[16] Alatalo K, Cales S L, Rich J A, et al. ApJS, 2016, 224: 38
[17] Ulvestad J S, Antonucci R R J, Barvainis R. ApJ, 2005, 621: 123
[18] Condon J J. American Institute of Physics Conference Series, 1992, 254: 629
[19] Baan W A, Klöckner H R. A&A, 2006, 449: 559
[20] Kovalev Y Y, Kellermann K I, Lister M L, et al. AJ, 2005, 130: 2473
[21] Yun M S, Reddy N A, Condon J J, et al. ApJ, 2001, 554: 803
[22] Helou G, Soifer B T, Rowan-Robinson M. ApJL, 1985, 298: L7
[23] Condon J J, Huang Z P, Yin Q F, et al. ApJ, 1991, 378: 65

[24] Maccagni F M, Morganti R, Oosterloo T A, et al. A&A, 2017, 604: A43
[25] Mingo B, Watson M G, Rosen S R, et al. MNRAS, 2016, 462: 2631

Study of Radio Continuum Emission in HI Absorption-line Galaxies

SONG Wen[1], WU Zhong-zu[1], GU Min-feng[2],
ZHU Ming[3], MI Li-gong[4], PENG Hao[1]

(1. College of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 4. School of Physics and Electronics, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun 558000, China)

Abstract: We analyzed the radio structure and brightness temperature for five galaxies with intrinsic neutral hydrogen absorption lines detected in the 40% Arecibo Extragalactic Neutral Hydrogen Survey (α.40 region) using VLBI archival data. The source nature of these five objects were then studied in combination with the estimated q value (the ratio of FIR to radio flux density), and WISE data. In our five sources, we found that NGC 315 and NGC 5363 show clear radio jet structure, while IC 860 and CGCG 049-057 show only a compact core at pc scale, however the total VLBI flux is less than 20% of NVSS flux. The brightness temperature of the core region of these four sources are all higher than 10^6K. In contrast, the remaining source, UGC 6081, shows no compact radio structure and is almost completely resolved. Based on the analysis of radio structure, brightness temperature, and the q value, we found that the radio continuum emission of these five sources has diverse origin, ranging from the radio jet, both starburst and jet, to pure starburst activity. These results indicate that the detection of neutral hydrogen absorption line may not depend on the origin of radio continuum emission. The classification based on the WISE data shows that five sources can be divided into two categories, three 4.6 μm bright galaxies, and two 12 μm bright galaxies. Interestingly, there are no dust-poor galaxies in our sample, implying that either the number of this kind of galaxies in the α.40 region may be low,or the detection rate of HI absorption lines in these galaxies is likely low.

Key words: galaxies; jet; starburst; far infrared; radio structure